

## 바이오-메디컬 자성나노입자 연구의 현황과 전망

민지현 · 송아영 · 김영근 \*

고려대학교 공과대학 신소재공학부, 서울특별시 성북구 안암동 5-1, 136-713  
미래유망 파이오니어 생체응용 나노결정 융합연구단, 서울특별시 성북구 안암동 5-1, 136-713

우준화

고려대학교 공학기술연구소, 서울특별시 성북구 안암동 5-1, 136-713  
미래유망 파이오니어 생체응용 나노결정 융합연구단, 서울특별시 성북구 안암동 5-1, 136-713

(2009년 1월 22일 받음, 2009년 1월 23일 최종수정본 받음, 2009년 1월 28일 게재확정)

자성나노입자는 초상자성 특성 및 물리적, 화학적으로 안정된 특성으로 인하여, MRI 조영제, 약물전달, 세포분리, 열치료법 등을 비롯한 바이오-메디컬 분야에 널리 응용되고 있다. 초기에는 균일한 물리적/화학적 특성을 유지하기 위하여, 미세하면서도 균일한 크기의 나노입자 제조에 연구가 집중되었으나, 최근에는 바이오-메디컬 분야에 직접 응용하기 위하여, 수용액에 대한 분산도 향상과 생체적합성 및 생체기능화를 부여하는 것에 연구의 초점이 맞추어지고 있다. 본 논문에서는 자성나노입자 연구의 현황을 살펴보고 향후 진행 방향에 대하여 조망해 보고자 한다.

**주제어** : 자성나노입자, 복합기능, 바이오-메디컬, 초상자성

### I. 자성나노입자 기술의 개요

현대사회에서 삶의 질의 문제가 중요하게 부각되면서, 바이오-메디컬 분야의 기술 개발에 대한 요구가 끊임없이 증대되고 있다. 한편, 나노기술은 바이오-메디컬 분야의 현안들을 극복할 수 있는 중요한 도구로 인식되고 있으며, 이에 나노-바이오 공학에 대한 관심은 높아지고 있다. 최근에는 여러 기능을 동시에 갖는 나노소자소재의 개발로 연구의 초점이 모아지면서, 나노구조를 기능성 소자로 만드는 방법과 나노구조로 만들어진 기능성 소자의 위치를 제어하고, 물리적 화학적 생물학적 특성을 조절하는 방법이 핵심 연구 주제로 대두되고 있다. 특히 자성나노입자(magnetic nanoparticle)는 기본적으로 일반적인 나노입자가 갖고 있는 특징들, 즉, 단위 부피당 표면적이 넓어서 소량의 대상 물질도 감지할 수 있다는 장점을 갖고 있는 것 외에, 다른 나노입자에 비해 화학적 안정성이 우수하며, 바이오프로브(bioprobe)로 사용될 때, 반복 측정이 가능하고, 자기장에 의해 위치 조작이 가능하다는 장점 또한 갖고 있어서, 자기공명영상(magnetic resonance imaging, MRI), 약물전달(drug delivery), 발열치료(hyperthermia), 생체물질검지(probe biosystem) 등과 같은 바이오응용분야에 활용되고 있으며, 고기록밀도 정보저장매체(data storage), 자성유체(ferrofluid), 촉매(catalyst) 등 광범위한 응용분야에 적용될 수 있다[1-5].

나노입자에 대한 연구는 1990년대부터 활발하게 진행되었다. 1990년 초기, 나노입자 연구의 관심은 균일한 크기를 가진 나노입자를 제조하고, 그것을 분산시키는 것이었다. 2000년대부터는, 나노입자의 모양과 크기, 그리고 구조에 따라 나노입자의 물리적, 화학적 특성이 달라지는 현상을 이용하여, 나노입자의 물성을 제어하는 것으로 연구의 방향이 진행되었다. 그러나 근래에 와서는 나노입자의 물성 제어를 넘어서서, 여러 기능을 동시에 갖는(복합기능, multifunctional) 나노입자 제조에 많은 노력을 기울이고 있다. 특히, 자성나노입자는 자기장에 의해 위치 제어가 가능하다는 장점을 가지고 있기 때문에, 복합기능 나노입자에 중요하게 응용되고 있다[6].

최근, 자성나노입자의 생의학적인 적용 가능 여부는 시장의 규모와 기술의 발전 속도를 결정하는 중요한 요소 중 하나로 인식되고 있다. 미국에서는 나노기술로 제조된 의약품에 대하여, 생체 유해 여부를 조사하는 연구에 많은 비용을 투자하고 있으며, 따라서 향후 나노입자 제조 기술은 단순한 다기능성 나노입자 제조를 넘어서서, 생체 적합성을 가진 광학, 자성 등의 기능이 포함된 나노입자 제조로 진화할 가능성이 매우 크다고 할 수 있겠다. Table I과 Table II에서는 자성나노입자를 생체 내/외에 응용할 경우, 치료 및 진단 등의 바이오-메디컬 분야에서 문제점과 해결방안에 대해 소개하고 있다.

복합기능성 나노입자 제조를 위하여, 다양한 형태가 강구되고 있는데, 합금형 나노입자, 아령(dumbbell)형 나노입자, 코

\*Tel: (02) 3290-3281, E-mail: ykim97@korea.ac.kr

**Table I.** Medical application with magnetic nanoparticles (*In vivo*).

| <i>In vivo</i> | 응용분야                   | 특징                                                                  | 문제점                                                                                                                        | 해결방안                                                                                                              |
|----------------|------------------------|---------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 치료             | 발열요법<br>(hyperthermia) | 발열 요법은 악성 종양 부근의 온도 상승을 통한 치료효과를 얻는 것을 목적으로 하며, 기존의 종양치료 요법들과 함께 병용 | - 현재 임상적으로 이용되는 발열요법은 적용 부위에 최적의 치료효과를 나타내는 온도(42~43도)를 어떻게 일정하게 유지시킬 것인가에 주안점을 두고 있음                                      | 발열 효율은 입자 크기 및 형태에 의해 좌우되므로, 균일한 나노입자 형성을 위한 적절한 합성공정이 발열치료 시 정밀한 온도 조절에 필수 요소                                    |
|                | 약물 전달<br>시스템<br>(DDS)  | 현재의 약물 치료는 주사 또는 경구 투여된 약이 혈중에 고르게 분산된 후 목표물에 도달하는 비율에 기초           | - 그러나 많은 약물 분자들은 목표물에 도달하지 못하는 경우가 많음.<br>- 화학요법은 암치료제의 독성으로 인해, 건강세포에도 손상을 주는 등 심각한 부작용이 존재                               | - 치료제 분자를 나노입자표면에 결합시킨 후, 원하는 표적 장기에 입자들을 끌어 당겨 특정 장기내 약물농도를 증가시킬 수 있어 다른 장기에 대한 부작용을 최소화 할 수 있음                  |
| 진단             | 핵자기<br>공명 영상법<br>(MRI) | 임상적 진단에 사용되는 핵자기 공명 영상 기술의 발전이 자성 조영제라는 새로운 부류의 약제의 필요성을 대두시킴       | - 강자성 나노입자들은 큰 자기모멘트를 가지며, 초소형 Fe입자는 시판되고 있는 같은 크기의 초상자성 철산화물입자보다 자기장 구배에 더 쉽게 반응<br>- 그러나 강자성 나노입자는 제조하기가 까다로우며 분산시키기 어려움 | - 나노크기의 강자성입자들은 외 환경과의 반응을 막기 위해 얇은 Au층으로 코팅<br>- Au는 잇따른 작용을 위해 생화학적 제재를 위한 양질의 표면을 제공 (thiol이나 S기를 통한 Au와 공유결합) |

**Table II.** Medical application with magnetic nanoparticles (*In vitro*).

| <i>In vitro</i> | 응용분야                          | 특징                                                                                                                                        | 문제점                                                                                                                                                         | 해결방안                                                                                                                   |
|-----------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                 | 생물학적<br>분자분리                  | - 약물전달, 초정밀 질병검출, 유전자치료, 초고속 유전자 스크리닝, 생화학적 검지와 빠른 독소제거에 응용 가능함<br>- 생체 분자의 분리에 관한 연구는 시료 매트릭스로부터 원하는 물질만을 선별하여 정제하는 방법인 고상추출(SPE) 개발에 집중 | - 대용량 액체에서의 물질의 분리, 농축은 일반적인 column SPE 방법을 이용할 경우 많은 시간이 소요됨<br>- 자기 흡착제를 사용하여 시료를 분리, 정제하는 magnetic SPE 법을 이용함으로써 시간 단축의 이득을 얻을 수 있음(DYNAL Biotech에서 상용화) | - 분리와 선택과정에서 자성 마이크로입자 대신 자성나노입자를 이용할 경우 얻을 수 있는 이점은 자기장이 없는 상태에서 일어날 수 있는 침전현상에 대해 안정적인 현탁액을 조제할 수 있다는 점임             |
|                 | 세포의<br>형질전환<br>(transfection) | - 세포내 형질 파악과 형질 전환을 위한 신속, 고효율 핵산 전달의 필요성 대두                                                                                              | - DNA 또는 재조합 바이러스와 같은 유전자벡터를 세포내의 특정부위로 유도하는 효율성 높은 시스템 개발에 대한 많은 노력이 진행 중                                                                                  | - 자기장내에서 자성나노입자와 결합한 유전자는 배양된 세포에서 몇 분 이내에 효과적으로 세포질 내로 들어가 세포 형질을 전환시킬 수 있음                                           |
|                 | 생물학적<br>분자들의<br>이동 및<br>형상조절  | - 물리적 힘들이 세포형태 및 기능의 조절뿐만 아니라 많은 질병이 진행되는 동안 중요한 역할을 함<br>- 이러한 기술은 세포에 가해지는 물리적 힘이 특이적 세포수용체를 통해 전달되어 세포내 생화학 및 유전자 발현 변화를 해독            | - 코팅된 자성입자들은 세포에 특이적인 물리적 스트레스를 줌으로써 세포의 스트레스에 대한 반응 연구에 많은 자료를 줄 수 있을 것으로 기대되나 기존의 마이크로 입자들은 비생리학적 스트레스를 부가함                                               | - 나노입자들은 바이러스와 같은 크기의 입자로서 바이러스가 세포에 감염될 때 발생하는 신호전달 체계와 유사한 생리학적 스트레스를 세포에 부과함으로써 보다 더 정밀한 연구가 가능함                    |
|                 | 생물학적<br>센서                    | - 우수한 생물학적 분자센서, microarray 활용이 가시화되고 있음<br>- 세포의 mRNA를 biotin으로 수식하고 슬라이드 표면에 고정된 유전자와 반응시킨 후 이에 결합한 세포의 유전자는 avidin이 수식된 나노입자로 검출       | - 고감도 센서개발은 여전히 매우 초기단계이며, 많은 과제들이 남아있음<br>- 마이크로 크기의 입자들은 분자 생물학적 인식과 상호작용을 방해하고 센서효율을 저하시키나, 100 nm 이하의 입자들을 검출하기 어려움                                     | - 자기저항 바이오칩은 많은 이론적 장점을 가지고 있는데, 가령 저 농도의 유전적 변이 등을 검출할 수 있음<br>- 신호 대 잡음비(SNR)가 의약에 사용될 수 있을 만큼 충분히 높은 자성나노입자 개발이 관건임 |

어셀 나노입자가 대표적인 예이다. 그 중 코어셸 타입의 나노입자의 경우, 물리적, 화학적 안정성이 상대적으로 우수하여서, 미국, 일본 등은 이미 90년대부터 실리콘 계열 물질과

광학특성을 갖는 반도체 물질 간의 코어셸 구조를 제작하였고, 최근에는 미국의 UC Davis, UC Berkely 등에서 금속-금, 금속-반도체 등 다양한 재료의 코어셸 구조 제작에 성공

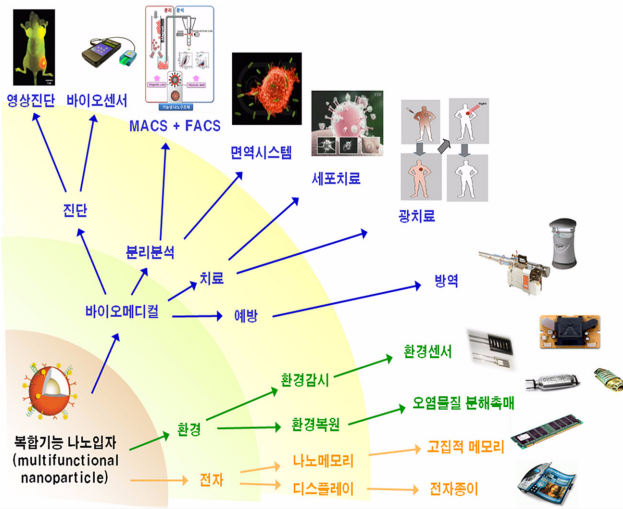


Fig. 1. Potential application of multifunctional nanoparticles.

하였으며, 독일의 Mainz 대학 등에서는 3층 이상의 다층 코어-셸 구조 제작하였고, 이와 관계된 특허 출원 및 공개, 논문 출판의 사례가 증가하고 있는 추세이다[7].

Fig. 1에서는 복합기능 나노입자가 응용 가능할 것으로 예상되는 세부분야를 도식적으로 표현하였다. 바이오-메디컬 분

야 뿐만 아니라 환경 및 전자기기 등 폭넓은 분야에서 응용할 수 있을 것으로 예상되며, 구체적으로는 영상진단, 바이오센서, 분리분석시스템, 세포 치료를 비롯하여 환경센서, 고집적 메모리, 차세대 디스플레이 등에서 활용할 수 있을 것으로 예견된다.

## II. 메디컬 나노입자관련 정책 현황

복합기능 나노기술 관련하여, 세계 각국에서 그 필요성이 제기되고 있으며, 정책적으로 육성하고 있다. 미국 과학재단 (NSF)의 2002년 인간의 수행능력 향상을 위한 융합기술 발전 방안보고서에 따르면, 최근 세계적으로 자성, 금속, 반도체, 세라믹, 고분자 등 다양한 물성을 가진 나노 구조물의 특성에 대한 기초연구가 광범위하게 진행됨에 따라, 이를 토대로 미래 거대 신산업 창출을 위한 융/복합 신기술의 개발이 활발하게 진행되고 있다고 언급하고 있다. 나노-바이오 기술 분야에서 진단 및 치료 목적으로 DNA, 단백질, 세포 등과 같은 바이오 물질의 분리, 정제, 영상처리 등과 같은 분야가 좋은 예라고 할 수 있는데, 특히 상기보고서는 ‘visionary technology’의 하나로 리포좀, 나노입자, 멤브레인 등과 같은 나노플랫폼을 활용하여 생체분자를 합성하거나 분석할 수 있는 생물학

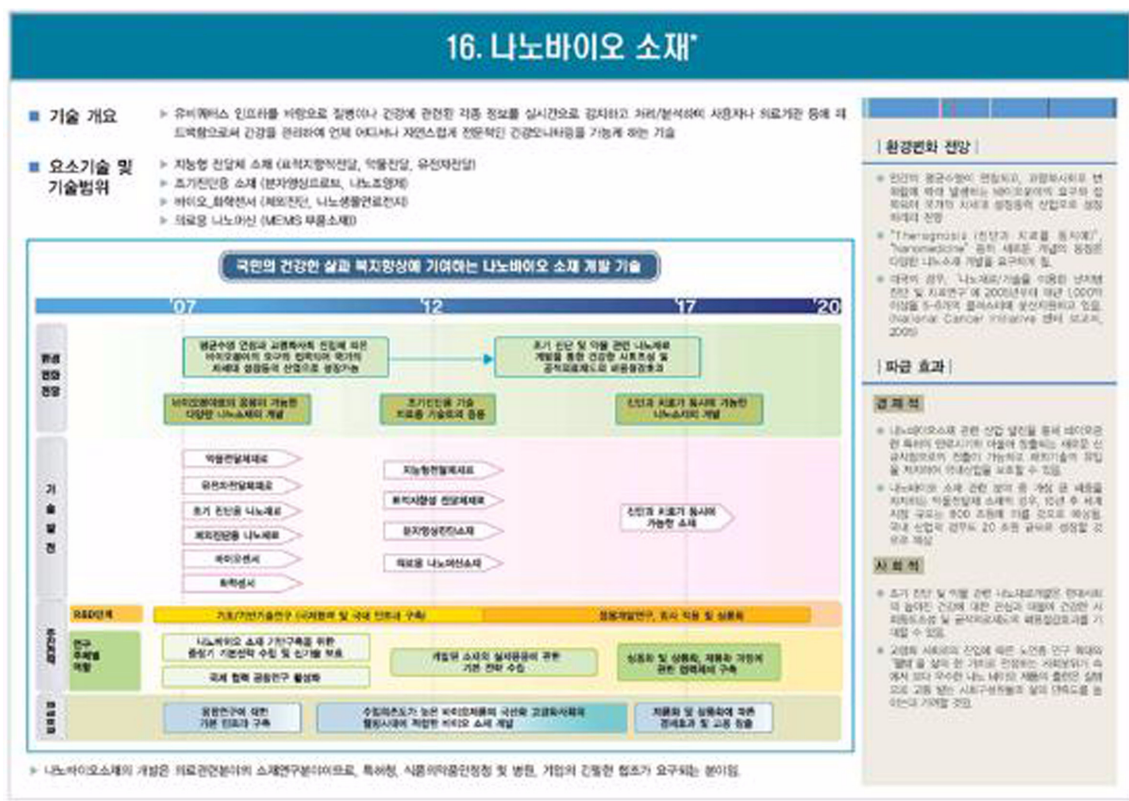


Fig. 2. The nanobio-materials technology roadmap [8].

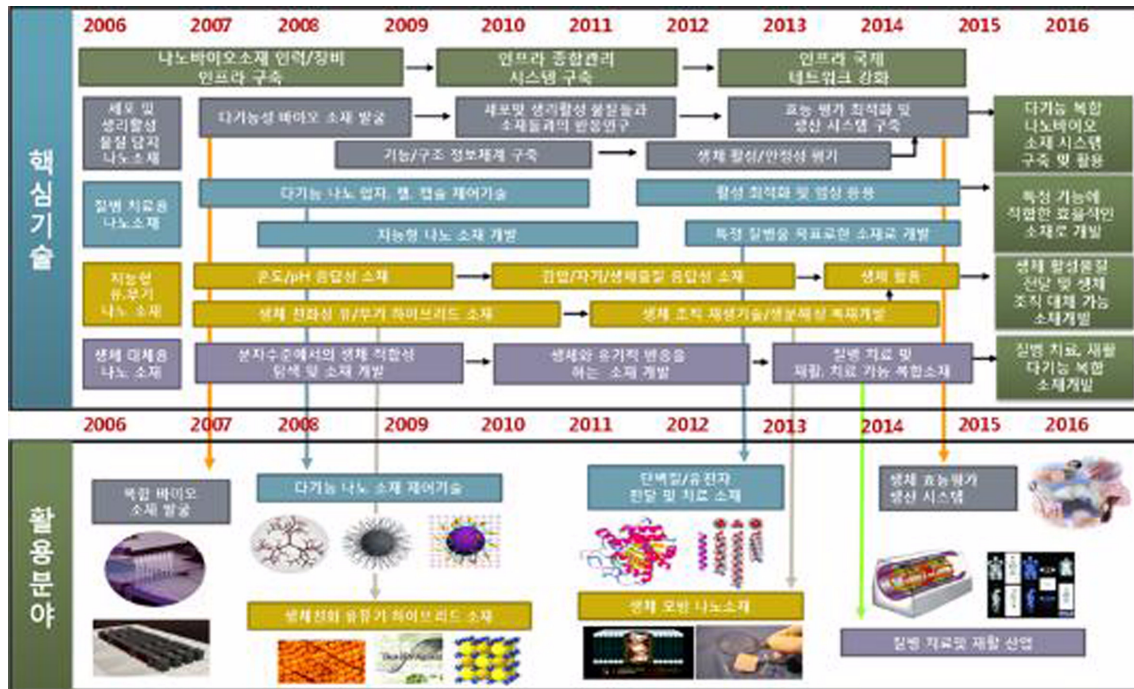


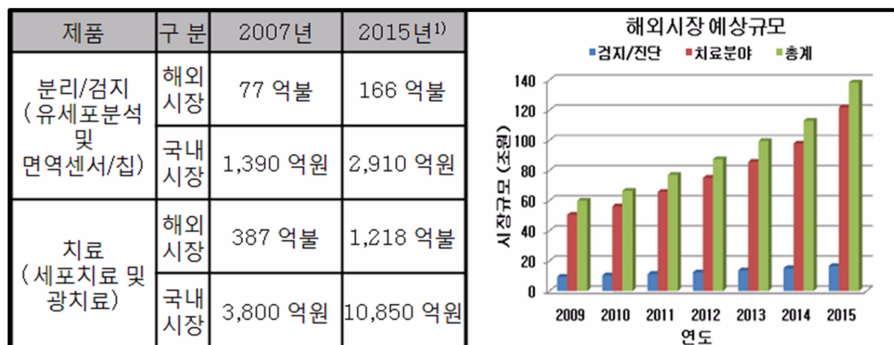
Fig. 3. The fusion materials technology roadmap [9].

적 마이크로프로세서를 제시한 바 있으며, 이를 활용하여 (i) 분자수준의 질병을 검지/진단/치료할 수 있는 나노약물, (ii) 독성/전염병의 추적이 용이한 매개체, (iii) 기초생물실험을 위한 생체분자 나노시스템 설계 등을 추구할 수 있을 것으로 파악하였다. 우리나라에서도 국가 R&D total roadmap(Fig. 2)상의 90개 국가중점육성기술 중 나노-바이오 소재 기술이 약물전달 기술, 생체정보 응용 기술들과 함께 대표적 기술로 분류되어 있으며, 국가 융합기술 발전 기본계획에서도 다기능성 바이오 소재 발굴이 핵심 기술로 분류되어 있다(Fig. 3). 또한 나노바이오 소재 기술의 실현 시기를 2014~2016년으로 예측하고 있으며, 이에 연구개발 지원을 확대하고 있다 [8, 9].

### III. 바이오-메디컬 자성나노입자관련 시장 현황

현재, 바이오-메디컬 분야와 관련한 제품군에서 나노기술은 태동기의 기술이므로 원천성 및 시장성 확보가 요구된다. 미국과학재단(NSF)에 따르면, 의학과 바이오기술 분야와 관련된 나노기술의 시장규모는 2015년 1800억 달러로 전망하였고, 국내의 경우, 2015년 분리/검지 분야가 2910억 원, 치료 분야가 1조850억 원에서 이를 것으로 전망하고 있다.

나노기술이 융합된 바이오-메디컬 기술은 조기진단 및 효율적인 치료를 가능하게 하여, 그 수요가 증가할 것으로 예측된다. Freedonia(2007)에 따르면, 나노기술이 적용된 의료산업제품의 수요가 연평균 17%씩 증가하고 있으며, 특히, 미



1) 각 분야별 연평균 성장률을 고려하여 예측

Fig. 4. The domestic and overseas market size.

국의 경우 나노약물, 나노진단, 나노기술기반 의료기기 등에 대한 수요가 2016년에 1천1백억 불을 초과할 것으로 예측하고 있다.

한편, 분리/검지 및 치료분야의 시장은 2007년 77억 달러, 치료분야 시장은 387억 달러 규모로, 연간 10 % 이상의 성장률을 보이고 있다. 분리/검지 분야 중 유세포분석관련 시장은 2003년 6천5백억 원에서 2008년 1조3천억 원으로 증가하였고, 연평균 15 %의 증가율을 보이고 있으며, 분리/검지 분야 중 면역센서 및 바이오칩 시장은 2003년 4조8천억 원에서 2008년 7조2천억 원으로 증가하였고, 연평균 9 %의 성장률을 보이고 있다(Kalorama Information, 2004). 또한, 나노 의약품의 핵심기술인 나노 약물전달체의 관련 시장 성장률은 연간 20 % 정도의 성장률을 보이고 있다.

국내 나노-바이오 시장은 분리/검지(유세포분석 및 면역센서/칩)분야에서 2007년에 1390억 원이었고, 분리/검지 분야 중에서 유세포분석 시장은 2008년에 130억 원의 규모이었으며, 바이오칩은 1천4백 억원의 시장규모를 보였고, 세포치료 분야는 2003년에 약 580억 원의 매출을 올렸다.

체내/체외진단을 위한 국내의 진단시약 시장은 시장수요의 증가에 비해 국내 진단시약 점유율이 15~20 % 불과하여, 수입규모가 급격하게 증가하는 추세이다. 세계 진단시약 시장은 미국, 일본, 서유럽이 전체 시장의 85 %를 차지하는데 비해, 국내 진단시약의 시장은 2006년에 3억 달러의 규모를 보였고, 국내 수요의 증가로 인하여 수입이 2003년 8천5백만 달러에서 2004년 9천6백만 달러로 급격하게 증가하고 있는 추세이다.

#### IV. 바이오-메디컬 나노입자관련 국내외 연구동향

중국 과학원 Chinese Academy of Sciences의 Chunhai Fan 그룹은 상업용 상자성 입자의 표면에 유기형광 고분자와 DNA를 연결시켜 DNA assay를 연구하였으며[10], 중국 Tsinghua University의 Yadong Li 그룹은 상위전이 발광(upconversion luminescent) 특성을 가진  $\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$  ion-pair doped hexagonal phase  $\text{NaYF}_4$  나노입자를 자성나노입자와 연결하여 자성 특성으로 DNA 분리에 응용하고 광학 특성으로 검출에 응용하는 연구하였다. 스위스 University of Zurich의 Brigitte von Rechenberg 연구팀은 초상자성 산화철 자성나노입자의 표면에 Polyvinyl alcohol 또는 Vinyl alcohol/vinyl amine copolymer로 코팅하고 형광물질인 Cy3.5 또는 Texas Red를 고정화시키고 이를 이용하여 체외(in vitro)에서 면양윤활세포(Sheep synovial cell)에 의한 흡수(uptake) 및 생체적합성을 관찰하였으며[11], 캐나다 National Research Council of Canada의 Benoit Simard 연

구팀은 졸-겔(sol-gel) 방법으로 산화철 자성나노입자를 합성하고 실리카를 이용하여 코팅한 후 다시 두 번째 실리카-셸을 코팅하면서 형광 물질을 실리카-셸에 첨가하여 자성 코어 광학 셸 형태의 나노입자를 만들고, 또한 바깥쪽의 실리카-셸을 이용하여 관능기를 유도함으로써 생물학적 표면처리를 시도하였다[12]. 또한, 독일 Max Planck Institute for Marine Microbiology의 Dirk Schüler은 주자성 세균(magnetotactic bacteria)에 있는 마그네토솜(magnetosome)을 녹색형광단백질과 결합하여 자성코어 광학셸 형태의 나노입자를 제조한 내용을 발표하였다[13].

초기에는 자성나노입자의 균일한 물리적/화학적 특성을 유지하기 위하여, 나노입자의 크기가 미세하면서도 입도분포를 향상시키는 것을 중심으로 연구가 진행되었다. 최근에는, 바이오-메디컬 분야에 자성나노입자를 직접적으로 활용하기 위하여, 자성나노입자의 생체적합성(bio-compatibility) 및 생체 기능화(bio-functionality)에 대한 필요성이 부각되고 있으며, 체내의 환경에서 활용 가능하도록, 수용액에 대한 나노입자의 분산성을 향상시키는 것에 연구의 초점이 맞추어지고 있다. 이를 위하여, 특정 고분자를 코팅하여 자성-고분자 코어셸 형태의 나노입자 제조기술을 개발하고 있고, 특정 질병 세포와 결합하여 진단 및 치료가 가능하도록, 나노입자 표면에 생체 분자(biomolecule)를 부착하여 생체기능화하는 연구가 진행되고 있다[14, 15].

국내에서는 2004년 한국과학기술원에서 금속간의 치환 반응을 이용한 코발트(Co)-백금(Pt) 코어셸 나노구조 제조를, 2005년 연세대에서 코발트(Co)-금(Au) (또는 Pd, Pt, Cu)과 같은 코어셸 나노구조를 발표한 바 있으며[16], 서울대 연구팀은 자성체나노입자를 보유한 실리카-금(Au) 코어셸 나노구조를 제조하여, 암 진단이 가능한 자기공명영상용(MRI) 조영제로 사용하도록 표적지향성 리간드를 부착하였다[17]. 최근에 와서 삼성전자를 비롯한 몇몇 기업에서 코어셸 나노구조를 태양전지와 전기 발광 소자에 응용하려는 연구가 진행되고 있으나, 생화학적 응용에 있어서는 그 결과가 미미한 실정이다. 한편, 고려대 연구팀은 5 nm 이하의 균일한 자성입자 제조와 디스크 타입의 자성나노입자 제조를 비롯하여, 자성체-금(Au), 자성체-반도체, 자성체-세라믹 코어셸 나노구조 합성에 성공하였으며[18-22], 2008년에는 연구팀에서 제조한 산화철( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )-금(Au) 코어셸 나노입자의 표면에 스트렙타비딘(streptavidin)-fluorescein isothiocyanate(FITC)를 부착하여 세포 분리에 대한 효율성을 측정한 연구를 진행하였다[23].

코어셸 구조의 나노입자 제조 기술은 대부분의 특허가 최근 3년간에 집중되어 있을 정도로 태동기에 있는 기술이며, 더구나 유사한 기술로 다양한 조합의 코어셸 제조가 가능하여 향후 보다 기능화한 나노입자 개발의 중요성이 부각되고 있다.

## V. 결 론

자성나노입자는 초상자성 특성 및 물리적, 화학적으로 안정된 특성으로 인하여, MRI 조영제, 약물전달, 세포분리, 열치료법 등을 비롯한 바이오-메디컬 분야에 널리 응용되고 있다. 초기에는 균일한 물리적/화학적 특성을 유지하기 위하여, 미세하면서도 균일한 크기의 나노입자 제조에 연구가 집중되었으나, 최근에는 바이오-메디컬 분야에 직접 응용하기 위하여, 수용액에 대한 분산도 향상과 생체적합성 및 생체기능화를 부여하는 것이 중요하게 인식되고 있다. 더불어, 바이오-메디컬 기술의 특성 향상을 위한 광학 특성 첨가 기술 또한 많은 연구가 진행되고 있다. 향후 바이오-메디컬 분야에서는 자성, 생체적합성, 생체기능성 등을 비롯, 광학, 전기적 특성 등을 모두 갖춘 복합기능 나노입자에 대한 필요가 커질 것으로 예견된다.

## 감사의 글

이 논문은 교육과학기술부 미래유망 융합기술 파이오니어 사업 과제번호 M10711160001-08M1116-00110의 지원에 의하여 작성하였으며, 2007년 10월 과학기술부에서 시행한 특정연구개발사업 미래유망 융합기술 파이오니어사업 기획연구 보고서(2006-05699)의 일부 내용을 소개하였습니다.

## 참고문헌

- [1] V. Kalambur, *Nanotechnology*, **16**, 1221 (2005).
- [2] C. Tsang, T. Lin, S. MacDonald, M. Pinarbasi, N. Robertson, H. Santini, M. Doerner, T. Reith, L. Vo, T. Diola, and P. Arnett, *IEEE Trans. Magn.*, **33**, 2866 (1997).
- [3] J. Nam, C. S. Thaxton, and C. A. Mirkin, *Science*, **301**, 1884 (2003).
- [4] P. Tartaj, M. del Puerto Morales, S. Veintemillas-Verdaguer, T. Gonzalez-Carreno, and C. J. Serna, *J. Phys. D.*, **36**, R182 (2003).
- [5] P. Gould, *Materials Today*, **7**, 36 (2004).
- [6] Y. Jun, J. Choi, and J. Cheon, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **45**, 3414 (2006).
- [7] D. Gerion, F. Pinaud, S. Williams, W. Parak, D. Zanchet, S. Weiss, and A. Alivisatos, *J. Phys. Chem. B.*, **105**, 8861 (2001).
- [8] 국가 R&D사업 Total Roadmap 중장기 발전전략안, 과학기술부 (2006).
- [9] 융합기술 종합발전 기본계획, 범부처 (2007).
- [10] H. Xu, H. Wu, F. Huang, S. Song, W. Li, Y. Cao, and C. Fan, *Nucl. Acids Res.*, **33**, e88 (2005).
- [11] K. Schulze, A. Koch, A. Petri-Fink, B. Steitz, S. Kamau, M. Hottiger, M. Hilbe, L. Vaughan, M. Hofmann, H. Hofmann, and B. von Rechenberg, *J. Nanosci. Nanotech.*, **6**, 2829 (2006).
- [12] D. Ma, J. Guan, F. Normandin, S. Denommee, G. Enright, T. Veres, and B. Simard, *J. Chem. Mater.*, **18**, 1920 (2006).
- [13] C. Lang and D. Schueler, *J. Phys.: Condens. Matter*, **18**, S2815 (2006).
- [14] T. Douglas and M. Young, US Patent No : US 6180389 (2001).
- [15] P. Prasad, E. Bergey, C. Liebow, and L. Levy, US Patent No : US 6514481 (2003).
- [16] J. Park, M. Kim, Y. Jun, J. Lee, W. Lee, and J. Cheon, *J. Am. Chem. Soc.*, **126**, 9072 (2004).
- [17] 현택환, 박원철, 김재윤, 대한민국 특허, 출원번호 : 10-2006-0122077, 출원일 : 2006. 12. 05.
- [18] J. H. Wu, S. P. Ko, H. L. Liu, S. Kim, J. S. Ju, and Y. K. Kim, *Mater. Lett.*, **61**, 3124 (2007).
- [19] 김영근, 조지웅, 민지현, 고승필, 소준영, 최성희, 대한민국 특허, 등록번호 : 10-0733794, 등록일 : 2007. 05. 25.
- [20] 김영근, 우준화, 류홍령, 고승필, 민지현, 조지웅, 이주현, 안부현, 한승엽, 대한민국 특허, 등록번호 : 10-0759715, 등록일 : 2007.09.12.
- [21] 김영근, 류홍령, 우준화, 민지현, 이주현, 대한민국 특허, 등록번호 : 10-0759716, 등록일 : 2007.09.12.
- [22] 김영근, 류홍령, 우준화, 민지현, 김유송, 대한민국 특허, 등록번호 : 10-0791731, 출원일 : 2007.01.04.
- [23] H. L. Liu, C. H. Sonn, J. H. Wu, K. M. Lee, and Y. K. Kim, *Biomaterials*, **29**, 4003 (2008).

## Research Status and Prospectives of Magnetic Nanoparticles in Bio-medical Applications

**J. H. Min, A. Y. Song, and Y. K. Kim\***

*Department of Materials Science and Engineering, Korea University, Seoul 136-713, Korea  
Pioneer Research Center for Biomedical Nanocrystals, Seoul 136-713, Korea*

**J. H. Wu**

*Research Institute of Engineering and Technology, Korea University, Seoul 136-713, Korea  
Pioneer Research Center for Biomedical Nanocrystals, Seoul 136-713, Korea*

(Received 22 January 2009, Received in final form 23 January 2009, Accepted 28 January 2009)

Magnetic nanoparticles are widely used for bio-medical applications such as MRI contrast agents, drug-delivery systems, cell separation and hyperthermia, thanks to their unique magnetic properties and physico-chemical characteristics. In the early stage, efforts were focused on synthesis of uniform nanoparticles of desired dimension to achieve targeted, stable functionalities. Recently, it has been of great interest in dispersion of such nanoparticles in aqueous solution and to render the nanoparticles bio-compatible with bio-functionality on request for utilization in bio-medical fields. In this paper, we survey the research status and give prospective on future work of magnetic nanoparticles for biomedical applications.

**Keywords :** magnetic nanoparticles, multifunctional, bio-medical, superparamagnetic